

中国南海东沙隆起北缘晚始新世构造裂点迁移及其源-汇效应

刘强虎¹, 彭光荣^{2,3}, 刘培^{2,3}, 余雄鹰^{1,4}, 熊万林^{2,3}, 周子强⁵, 朱红涛¹

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉430074; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳518054; 3. 中海石油深海开发有限公司, 广东深圳518054; 4. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡214126; 5. 帝国理工大学地球科学与工程学院, 英国伦敦SW72AZ]

摘要:为验证超覆背景下的残余地貌能否为沉积物产出提供有效信息,以珠江口盆地内最大凸起单元——东沙隆起作为研究对象,应用全覆盖地震数据及钻井约束,提取了晚始新世恩平组残余地貌上关键流域的河道纵向剖面,刻画了边界断裂的活动性,量化了砂体粒度及沉积通量的时-空变化。研究评估了残余地貌特征与沉积区粒度和通量变化间的匹配程度。研究表明:两大关键流域的河道剖面均存在构造裂点,且与晚始新世活跃的边界断层相匹配。裂点溯源迁移时可能沟通了内流水系,与汇区粒度整体变细,通量变大规律一致。源区地貌特征和汇区沉积记录在地貌演化的视角下指示遭受后期改造较弱的残余地貌很可能仍然保存着深-时的源-汇信息。精细解剖残余地貌、源区地形坡度、基岩岩性与裂点迁移,有助于深-时源-汇系统不同期次重建及砂体性质与规模预测。

关键词:构造裂点; 沉积响应; 源-汇系统; 晚始新世; 东沙隆起

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Migration of the Late Eocene knickpoints and their source-to-sink system along the northern margin of the Dongsha Uplift, South China Sea

LIU Qianghu¹, PENG Guangrong^{2,3}, LIU Pei^{2,3}, YU Xiongbiao^{1,4}, XIONG Wanlin^{2,3}, ZHOU Ziqiang⁵, ZHU Hongtao¹

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Hubei, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Limited, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 3. Deepwater Development Limited, CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 4. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Jiangsu, Wuxi 214126, China; 5. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College of London, London SW72AZ, London)

Abstract: This study aims to verify whether remnant landscapes preserved by stratigraphic overlapping can provide useful insights into characterizing sediment production. Focusing on the Dongsha Uplift, the largest uplift unit in the Pearl River Mouth Basin (PRMB), and using full-coverage seismic data and well constraints, we extract the longitudinal channel profiles of key catchments from the remnant landscapes of the Late Eocene Enping Formation, characterize the boundary fault activity and quantify the spatiotemporal variations in sand-body grain size and sediment flux. Furthermore, the correlation between the characteristics of remnant landscapes and variations in the grain size and sediment flux in the sedimentary areas is assessed. The results indicate that the observation of tectonic knickpoints in the channel profiles of the two key catchments is consistent with the activities of boundary faults during the Late Eocene. These knickpoints may have facilitated interconnections between closed drainage systems during their headward migration, leading to overall finer grain size and greater sediment flux as archived in the sink area. Importantly, our results illustrate that geomorphological features of the source area and sedimentary records of the sink area can be successfully reconciled in terms of landscape evolution; this implies that remnant landscapes with weak post-burial deformation still preserve deep-

收稿日期:2024-10-10;修回日期:2025-01-03。

第一作者简介:刘强虎(1988—),男,博士、教授,含油气盆地沉积学、陆相源-汇系统。E-mail:liuqh@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41902112);中海油科技专项(CCL2023SZPS0073)。

time source-to-sink information. The fine analysis of remnant landscapes, and detailed characterization of source area slope, bedrock lithology, and knickpoint migration contribute to the reconstruction of deep-time source-to-sink systems across different stages, as well as improvement of the predictions of sand-body properties and scales in the systems.

Key words: tectonic knickpoint, sedimentary response, source-to-sink system, Late Eocene, Dongsha Uplift

引用格式:刘强虎,彭光荣,刘培,等. 中国南海东沙隆起北缘晚始新世构造裂点迁移及其源-汇效应[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 846–859. DOI: 10. 11743/ogg20250310.

LIU Qianghu, PENG Guangrong, LIU Pei, et al. Migration of the Late Eocene knickpoints and their source-to-sink system along the northern margin of the Dongsha Uplift, South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 846–859. DOI: 10. 11743/ogg20250310.

深-时源-汇系统研究涉及源区、搬运过程和汇区之间的相互作用,准确解读沉积时期源区地貌及所含地质信息是当前研究的关键地质问题^[1-3]。然而,源区地貌演化过程复杂多变,受到构造活动、气候变迁、侵蚀与沉积等多种因素的影响^[1,4-8],使得沉积时期源区古地理格局往往难以直接恢复。另一方面,这一复杂的地貌过程也塑造了沉积物的组分和结构,显著控制着其后的沉积过程。因此,能否基于对残余地貌解剖来获取沉积物特征的有效信息是当前亟待回答的问题。

近年来,针对第四纪地貌的研究取得了长足进展,认识到河流的动态侵蚀过程在驱动地貌演化和沉积物产出上的核心作用。因河流溯源侵蚀形成的河道纵向跌坎称为河流裂点(knick point)^[9],裂点在河床纵向剖面上表现为缓坡带与陡坡带的转折点或拐点,即裂点之上为缓坡带,之下为陡坡带。河流体系作为沉积物搬运过程中重要载体,源区地貌高低起伏会影响河道水系的搬运方式。其中,Attal等^[4]对美国北加利福尼亚州现代河流费瑟河(Feather river)流域中沉积物粒度的研究揭示,粒度明显受控于裂点上下游流域地貌差异。具体来说,裂点上游地形坡度缓,沉积物粒度较下游明显更细,最大砾石的长轴直径为260 mm;裂点下游地形坡度陡,沉积物粒度多集中为粗粒碎屑岩,超大砾石直径可达10 m。Whittaker和Walker^[10]在解析意大利亚平宁山脉中部断陷盆地断层下盘源区地貌演化时发现,裂点形成原因与断层活动速率增大息息相关。裂点下游区域地貌坡度陡,河流以下切作用为主,对应较高的侵蚀速率,产出粗粒碎屑物并贡献更大的沉积通量;上游区域地貌坡度缓,河流以侧蚀作用为主,对应较小的侵蚀速率,产出细粒碎屑物^[1]。研究表明,构造裂点发育成因通常为区域岩性差异风化剥蚀、构造抬升或海(湖)平面变化及河流袭夺引起侵蚀基准面下降^[9,11]。

南海东沙隆起作为珠江口盆地内新生代最大的盆内凸起单元,呈NEE-SWW向展布,面积近28 000 km²。

在地震资料全覆盖框架下,解剖东沙隆起地貌形态对周缘主力富烃坳陷或凹陷(尤其是惠州凹陷与白云凹陷)的沉积充填过程及油气成藏有重要意义。然而,当前关于东沙隆起对富烃凹陷供源的作用仍侧重于分水岭-分水线关联的流域单元划分,尚未有效厘定区内构造裂点信息及其对沉积砂体的控制。本研究尝试重新解读源区信息,检验东沙隆起北缘构造裂点迁移与同期沉积过程和堆积产物间的联系,以探讨残余地貌在深-时源-汇研究中的潜在重要意义。同时,也为周缘惠州凹陷南部断裂带沉积砂体性质、规模预测提供新切入点,支撑油气勘探实践。

1 地质概况

南海东沙隆起位于珠江口盆地东部,与周边的潮汕坳陷和番禺低隆起等地质构造相邻,呈自东北向西南倾没的大型鼻状隆起,长约550 km,宽约60 km^[12](图1a)。该隆起在始新世—渐新世呈现为隆升剥蚀,晚渐新世—早中新世表现为持续沉降,中中新世至今为非补偿沉积过程^[13](图1b)。单竟男^[14]通过对东沙隆起附近钻井LF35-1-1开展中生代以来的磷灰石与锆石(U-Th)/He年龄反演,揭示井区在早始新世—早渐新世经历了强烈的抬升剥蚀,地层剥蚀量约为2 000 m;晚渐新世—早中新世持续沉降时期(25 Ma以来),早期断陷向拗陷转化,呈区域性整体沉降,海水自西向东侵入,早期隆起西段有海侵现象,晚期隆起带被淹没,局部发育礁滩型碳酸盐岩油气藏^[15]。垂向上,以晚始新世(恩平组)为界,东沙隆起存在一个相对稳定的沉降期,地层超覆为中、晚始新世期间残余地貌信息的保存提供了较好条件,尤其是多级高点(潜在构造裂点)的拾取。

就源区地貌形态变化而言,基岩组成及其风化改造是物质基础,构造和气候为关键驱动因素^[11]。东沙隆起基底主要由中生代燕山期中-酸性岩浆岩组成,间夹燕山早期中-酸性侵入岩和基性喷发岩(图1c),已钻

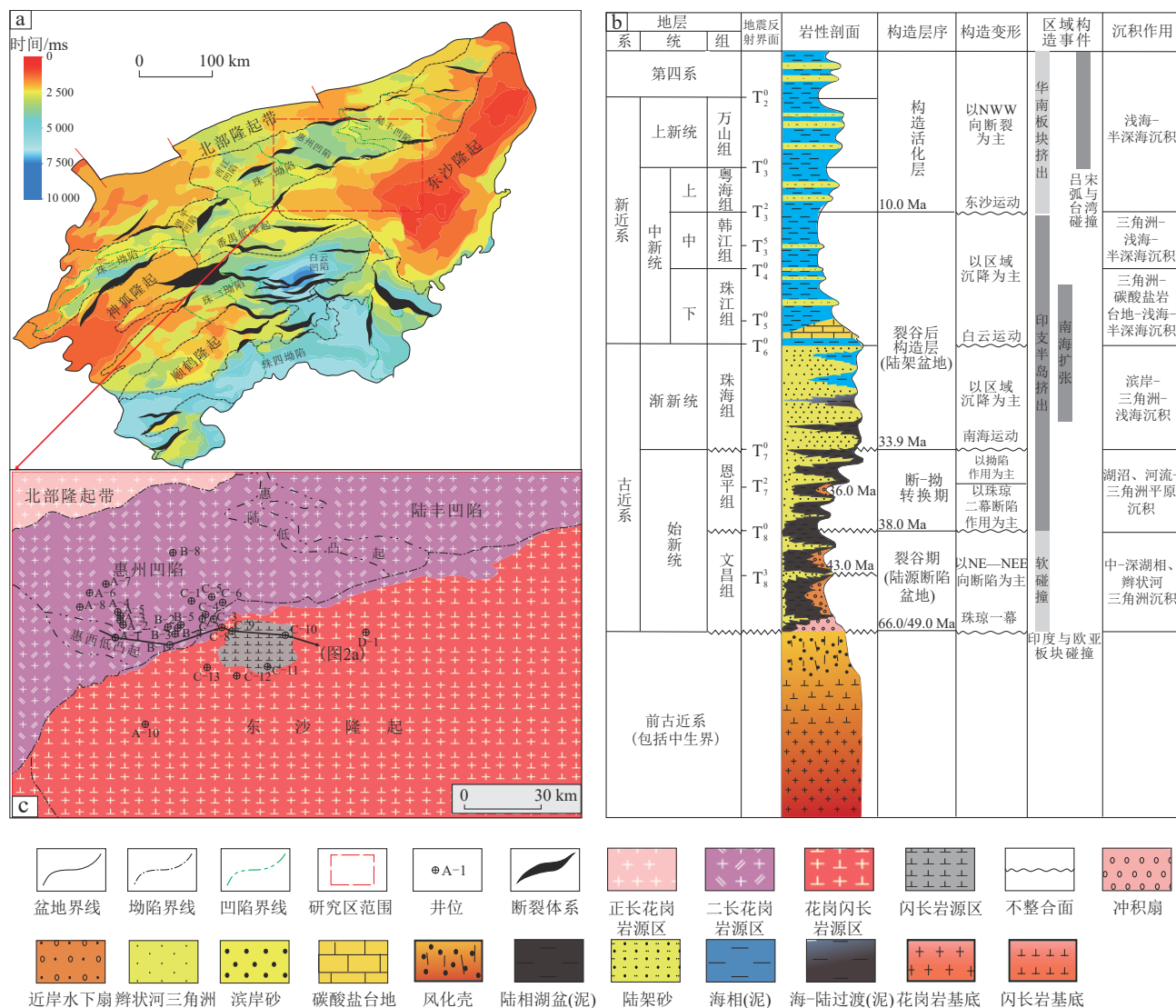


图1 南海东沙隆起地貌格局(a)、地层综合柱状图(b)及北缘基底岩性分布(c)

Fig. 1 Topographic pattern (a), synthetic stratigraphic column (b), and the basement lithology map along the northern margin (c) of the Dongsha Uplift in the South China Sea

并利用钾-氩(K-Ar)法和铷-锶(Rb-Sr)法获得东沙隆起基岩样品绝对年龄范围处于105.00 ~ 72.78 Ma^[16]。通过钻遇基底钻井及地震联合标定(图2)可知,东沙隆起北缘存在3种地震反射结构,从西至东分别是中、低频、弱振幅、断续-杂乱反射,中-高频、中-弱振幅、中等连续反射及中-高频、中等振幅、较连续反射(图2a)。井-震标定可知,3种地震反射结构分别指示二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩(图2b)。相同气候条件下,3种基岩矿物组分及结构差异,东沙隆起北缘源区差异风化,即二长花岗岩—花岗闪长岩—闪长岩的风化效能依次递减^[17],近端风化成砂效率高、偏粗粒,远端风化成砂效率低、偏细粒,使得晚始新世具备探讨构造裂点迁移及源汇剥蚀效应的条件。

2 源区裂点拾取及方法体系

河道剖面记录着河流对构造活动的响应,尽管这一过程也同时受气候和岩性的调节。断层下盘河流常遵循基岩水动力方程,其侵蚀速率(E)可表示为基岩剥蚀系数(K)、上游面积(A)和坡度(S)的函数,即: $E = KA^{0.5}S^{18}$ 。因此,当基岩剥蚀系数/岩性相对均一时,河道陡峭系数($k_{sn}, k_{sn} = A^{0.5}S$)可用于指示侵蚀速率在空间上的相对大小,并进而可表征产出沉积物的粗细^[4]。另一方面,当河道剖面上陡峭系数发生明显变化且与基岩差异无关时,该变化的拐点即为构造裂点。研究表明,构造裂点是对断层活动性增强的响应,会自下游

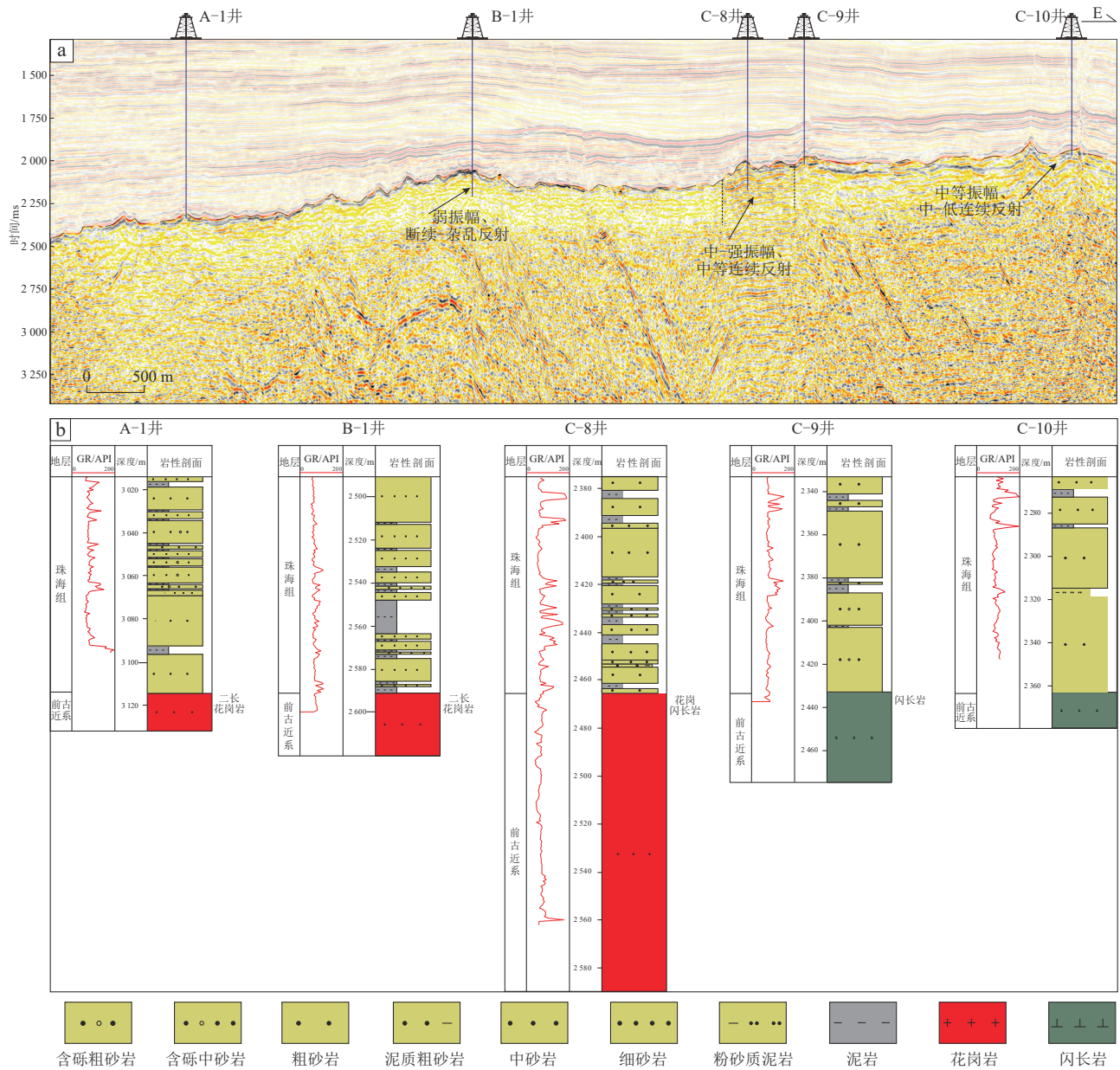


图2 南海东沙隆起北缘A-1井至C-10井过井地震地层格架及基底岩性连井对比剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Well-tied seismic stratigraphic framework section and basement lithology correlation across well A-1 to C-10 of the northern Dongsha Uplift in the South China Sea (see Fig. 1 for the section location)

a. 过井地震地层格架;b. 基底岩性连井对比剖面

断层逐渐向上游迁移并改造地貌^[19]。

基于研究区全覆盖的地震数据(面积近50 000 km²)及关键井位控制约束,东沙隆起北缘残余地貌,以东沙隆起分水岭为界分别向南、北两侧流域供源, T_8^0 、 T_7^0 及 T_6^0 关键地震反射界面依次向源区高点超覆终止,其中 T_8^0 与 T_7^0 界面超覆线限定并记录晚始新世恩平组沉积时期地貌形态(图3)。值得注意的时候,恩平组沉积后形成的隆升单元(如火山喷发、岩浆底侵等)未被视作有效物源,故在地貌解剖过程中不予考虑(图3b)。研究区更大尺度的后期改造主要表现为整体抬升或沉降,

故可认为这种改造对河流地貌在空间上差异或裂点的影响有限。在遭受后期改造微弱的区域,超覆区的残余地貌得到了较好的保留(图3c),可用于分析古流域单元的剥蚀过程。

为系统刻画剥蚀区地貌特征,进行了东沙隆起北缘关键地质界面 T_8^0 与 T_7^0 的追踪,并在转换格式后开展常规水文分析。首先,将Petrel中 T_8^0 与 T_7^0 的层位数据以Zmap+格式导入Global mapper软件,据区内地理范围和经纬度,将栅格数据从WGS 84地理坐标系投影到UTM投影坐标系(50 N区);其次,采用Global

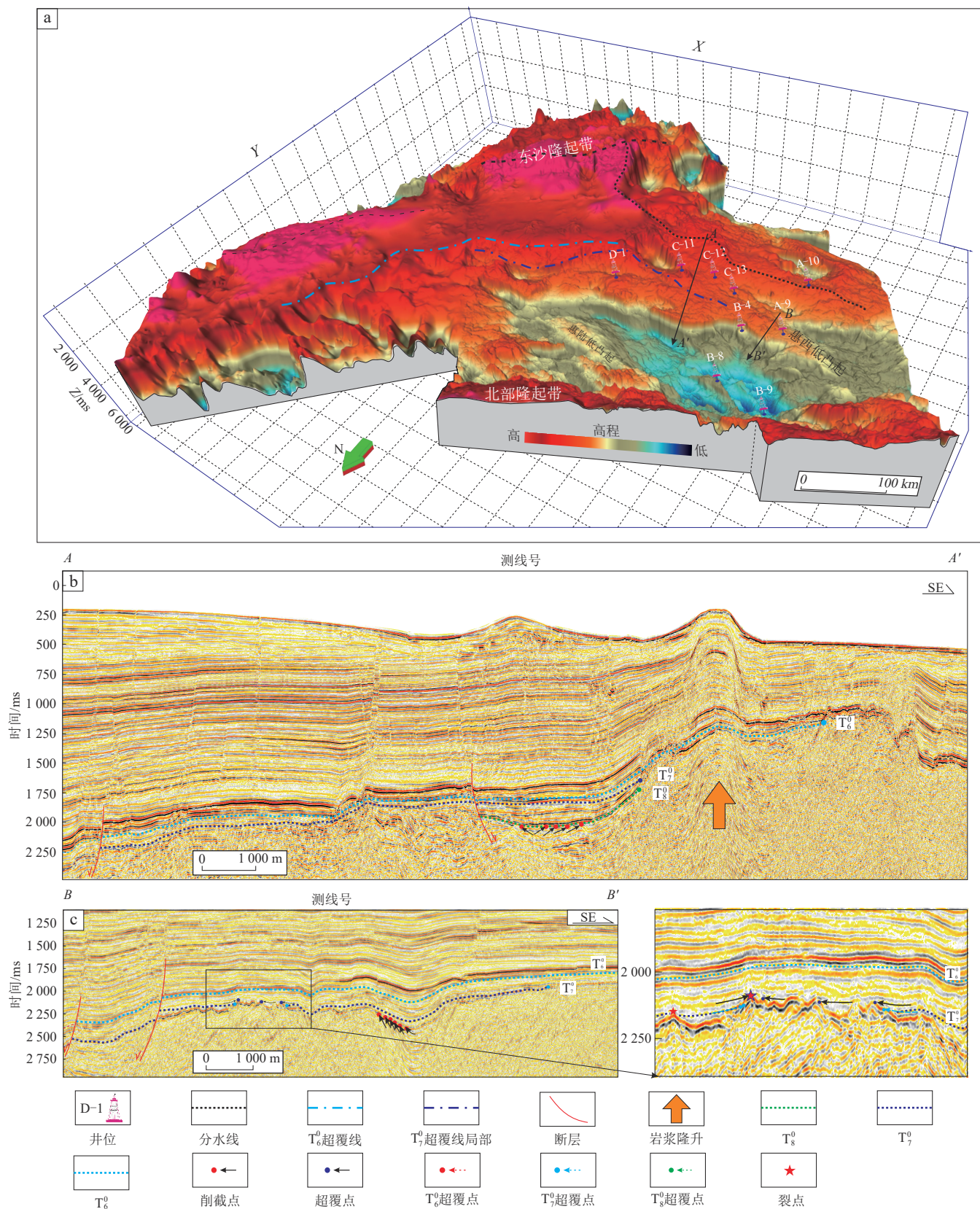


图3 南海东沙隆起北缘 T_8^0 界面残余地貌及垂直隆起走向地震地层格架剖面

Fig. 3 T_8^0 interface remnant landscape and seismic stratigraphic framework section perpendicular to the strike for the northern Dongsha Uplift, South China Sea

a. 残余地貌; b, c. 地震地层格架
(X, Y : 大地坐标; Z : 垂向的双程旅行时。)

mapper 默认的采样方法将层位数据转换为 50 m × 50 m 的栅格格式 (tiff); 最后, 基于栅格数据使用

TopoToolbox 工具对剥蚀区开展常规的水系分析^[18] (图4a)。具体操作过程包括: ① 借助 FLOWobj 中内嵌

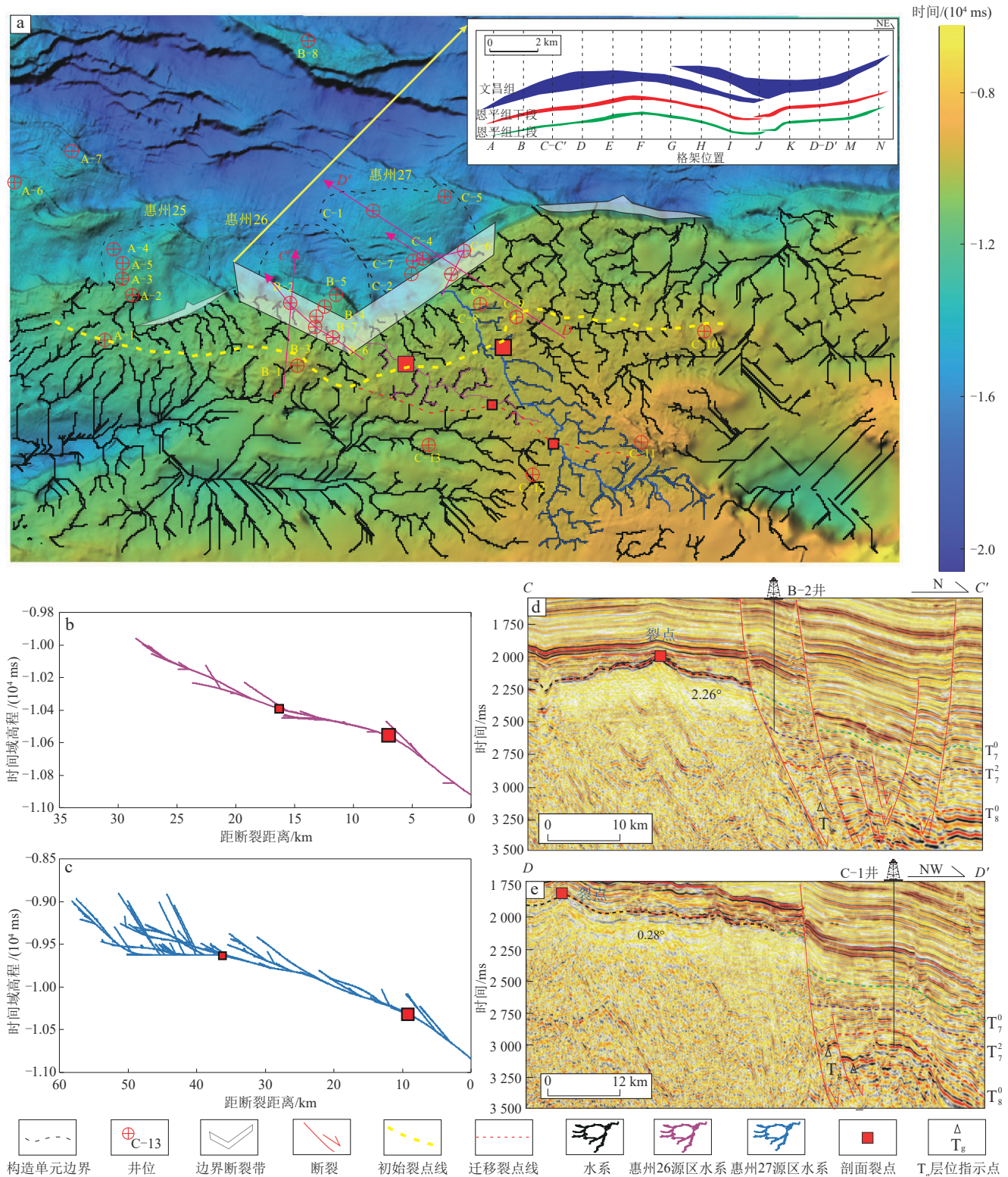


图4 南海东沙隆起北缘晚始新世 T_g^0 与 T_7^0 界面超覆区地貌水系、陡-缓坡河道剖面纵向形态提取及陡-缓坡流域内过井地震地层格架剖面
Fig. 4 Geomorphic drainage systems of the T_g^0 and T_7^0 interface overlapping area, longitudinal channel space extraction of steep-gentle slope zone, and well-crossing seismic stratigraphic framework sections of steep-gentle slope catchment of the Late Eocene in the northern Dongsha Uplift, South China Sea

a. 超覆区地貌水系; b, c. 河道剖面纵向形态; d, e. 过井地震地层格架

的D8流向算法对投影后的栅格高程数据进行流向、流量计算,并自动识别剥蚀区的水系网络^[20];②针对研究区内的关键流域,提取主要河流沿源头到河口的河床高程变化剖面以分析其纵向形态特征;③在提取的河道剖面基础上,使用Knick point finder工具识别流域中的裂点(knick points)^[21](图4b, c)。值得注意的是,Knick point finder是通过多次计算给定的实际剖面和不断迭代的重建剖面间的差值来工作。在每次迭代中,移除给定剖面和重建剖面间差值最大点的曲率限制,直至差值减少到一定程度。Knick point finder具有客观和可重复性强的优点,被广泛应用在第四纪和深-时地貌分析研究中^[20-21]。但其拾取裂点的质量与数据分辨率等多因素有关,因此仅侧重Knick point finder识别出的大尺度裂点(图4b, c)。

结果表明,向惠州26和惠州27分别供源的两大流域均存在两期裂点,表明研究区遭受了两期基准面下降(图4)。根据裂点据断裂的距离,将两个流域中靠近断裂的两个裂点称为二期裂点,在更远端的则称为一期裂点。其中,左侧惠州26流域两个裂点间距约10 km,右侧缓坡流域两个裂点间距大于25 km,指示分期流域作用变化,即恩平组沉积内部(T_8^0 与 T_7^0 界面超覆限定区)流域存在跃迁、外扩,且陡缓坡流程存在差异溯源变化。进一步提取流域地震格架剖面后,可知惠州26流域二期裂点下游地形坡度近 2.26° (图4d),而惠州27流域二期裂点下游坡度平缓,约为 0.28° (图4e)且对应闪长岩基岩(图1c),平面尺度地形高点与河流剖面纵向形态的拐点存在一定叠合。

3 汇区多尺度构造-沉积特征

考虑河流下切侵蚀、沉积物产出及沉积记录间的成因联系,基于源区构造裂点的拾取,分析边界断裂体

系活动性、地形坡度同汇区沉积物粒度、沉积通量的耦合关系,进而示踪校验恩平期构造裂点迁移,探讨其对深-时源-汇系统的影响。

3.1 边界断裂活动性特征

在始新世区域应力的持续作用下,区内NE向和NW向先存断裂共同形成了特征的“Z”字形的断裂组合,其活动控制着凸起侧的地貌特征^[22](图4a)。沿“Z”形控边断裂选取与惠州26和惠州27流域对应的区段,分别统计了文昌组及恩平组上、下段断层活动性(图5)。结果表明,①文昌组以断裂强烈活动为主,惠州26构造区活动性(断层活动性系数平均值约2.50 m/Ma)显著高于惠州27构造区(断层活动性系数平均值约1.50 m/Ma),表明惠州26流域较惠州27流域遭受了更强的隆升;②晚始新世恩平组沉积时期,断裂活动性整体减弱(断层活动性系数平均值约0.50 m/Ma),其中惠州26构造区恩平组上段活动性(断层活动性系数平均值约0.75 m/Ma)高于恩平组下段(断层活动性系数平均值约0.30 m/Ma),但惠州27构造区恩平组内部断裂活动性差异小。

3.2 沉积充填特征

基于岩性组合(含粒度变化)及沉积通量信息尝试探索裂点迁移对沉积的控制影响,选取顺惠州26和惠州27流域的沉积区连井格架。其中,NW向B-6井至B-2井连井(惠州26流域,图6a)显示,近端B-6井与B-3井在文昌组以高幅箱状厚层砂砾岩为主,远端B-2井转换为中厚层含砾中粗砂岩,指示为顺转换带入口稳定推进的扇三角洲沉积;恩平组上段断裂活动减弱,岩性粒度变细,以含砾中粗砂岩至中砂岩为主,层厚减薄,GR曲线呈齿化箱状至齿化漏斗状,B-3井岩心呈不等粒结构,砂砾混杂堆积,无定向性,粒径0.5~5.0 cm,

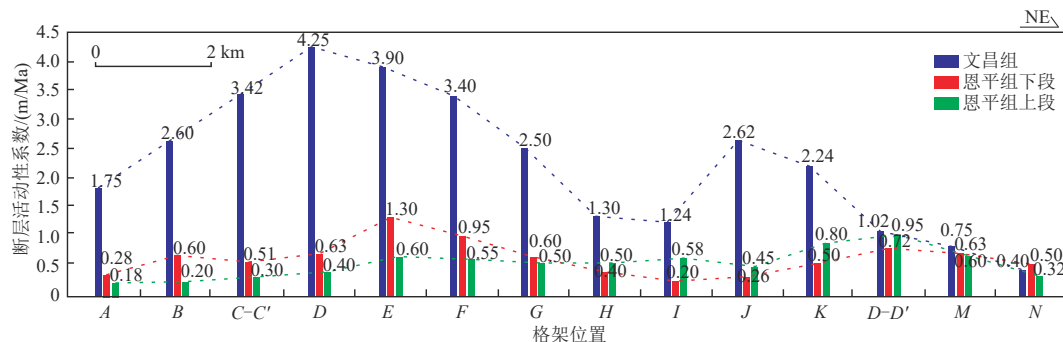


图5 南海东沙隆起北缘惠西南地区始新世文昌组-恩平组沉积期断裂活动性分布柱状图(格架位置见图4a。)

Fig. 5 Histogram showing the fault activity during the deposition of the Eocene Wenchang and Enping formations in southwestern Huizhou Sag of the northern Dongsha Uplift, South China Sea (see Fig. 4a for the framework location)

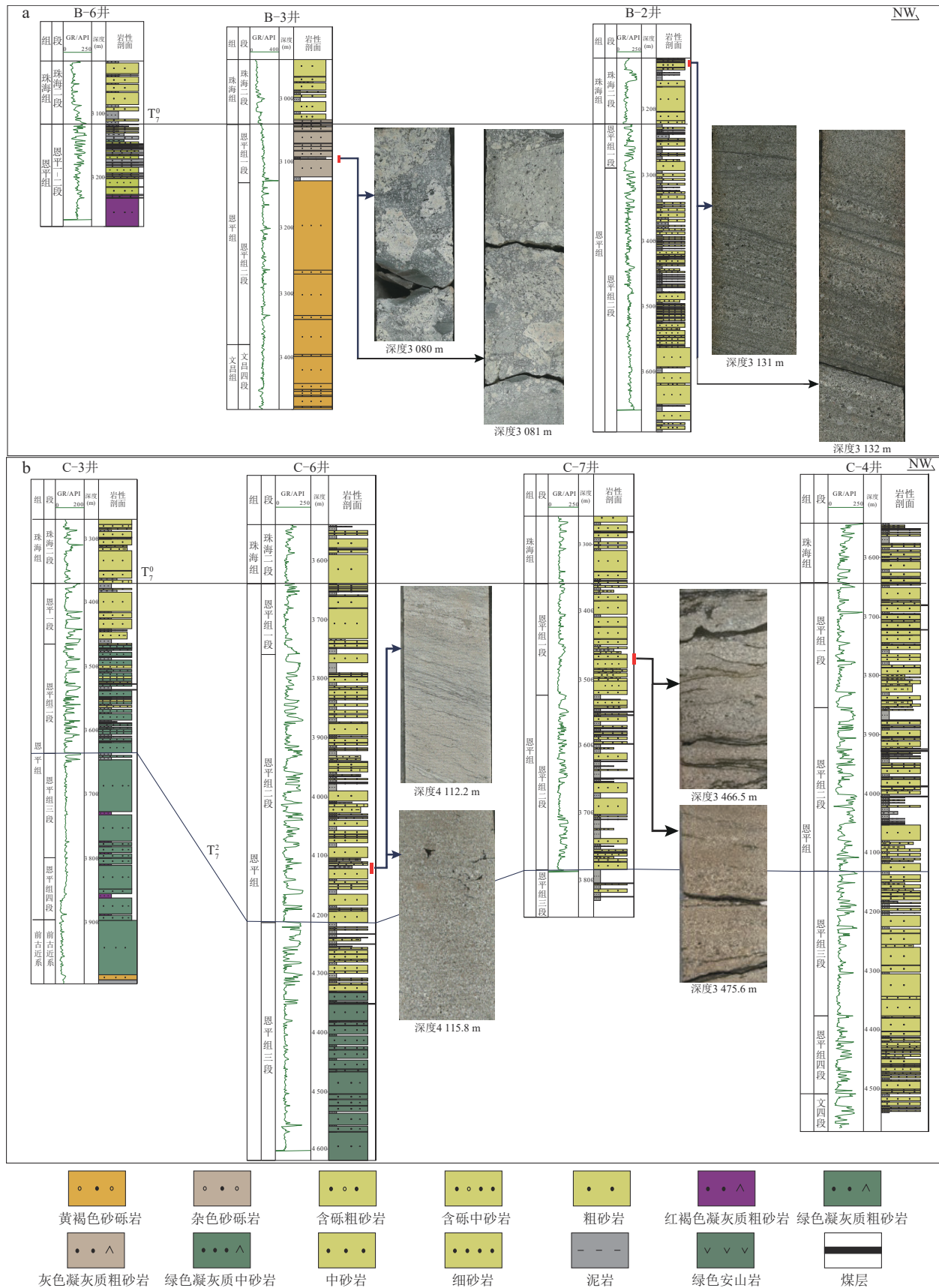


图6 南海东沙隆起北缘晚始新世(恩平组沉积期)陡、缓坡流域连井地层格架剖面及岩心刻度(位置见图4a)

Fig. 6 Stratigraphic framework and core calibration of wells in the Late Eocene steep and gentle slope catchment (Enping Formation) of the northern Dongsha Uplift, South China Sea (see Fig. 4a for the location)

a. 陡坡流域B-6井至B-2井连井地层格架剖面;b. 缓坡流域C-3井至C-4井连井地层格架剖面

结构成熟度低,B-2井岩心具明显板状交错层理,层系间以正粒序为主,局部可见波纹交错层理,指示水下方河道沉积。与之对应,顺惠州27流域的C-3井至C-4井连井地层格架(图6b)未系统揭示文昌组地层,但恩平组下段以齿化箱状中厚层中粗砂岩为主,近端含凝灰质,泥岩夹隔层较惠州26流域明显增多;恩平组下段岩性以中砂岩为主(局部含煤线),层厚明显减薄,以齿化箱状及正反韵律为主,其中近端C-6井岩心具典型正粒序、波状交错层理,C-7井岩心具多期正粒序,指示牵引流作用序列。垂向上,关联 T_8^0 和 T_9^0 界面保留高点-构造裂点拾取(图4a),恩平组下段至上段沉积粒度变细、厚度减薄,惠州26构造区由重力流向牵引流过渡,即扇三角洲至辫状河三角洲转换,惠州27构造区以牵引流为主,即辫状河三角洲主体,响应陡缓坡源区流域风化剥蚀产物的差异及转换。

综合岩心、连井及地震资料可知,恩平组早期湖盆表现为水体弱分隔的宽缓湖^[15],汇区形成中粗粒沉积体,呈大-中型、中-厚层扇状-片状分布(图7a),其中惠州26构造区发育含砾扇三角洲沉积,惠州27构造区发育中-粗粒辫状河三角洲沉积^[23];恩平组晚期地层填平补齐,湖盆表现为广而浅的特点^[24],汇区以中-细粒沉积体为主,陡坡流域-惠州26构造区继承性中-粗粒沉积,惠州27构造区粒度明显变细且含多层薄煤层,总体呈大型、中-薄层片状分布(图7b),其中缓坡流域对应中-细粒辫状河三角洲沉积范围显著扩大,陡坡流域对应中-粗粒扇三角洲沉积范围继承性发育、甚至小幅萎缩。

3.2.1 沉积粒度

统计区内15口关键钻井晚始新世(恩平组)沉积粒度(图8),可知平面上,惠州26流域对应的沉积区粒度明显较惠州27流域粗,以粗砂岩或砂砾岩为主(B-2井及B-3井),近端砂砾岩占比可超50%,匹配花岗闪长岩源区;与之相对,惠州27流域所对应的沉积区(C-2井至C-5井)以中-细砂岩为主,对应闪长岩源区,且凸起西部倾末端对应井区(A-3井至A-7井)亦以中-细砂岩为主。垂向上,惠州27流域恩平组下段(早期)沉积粒度较上段(晚期)粗,响应中-粗砂岩至粉-细砂岩转换,基岩岩性存在花岗闪长岩向闪长岩的过渡(图1c)。

3.2.2 沉积通量

从平面尺度校验南海东沙隆起北缘源区构造裂点关联的源区流域面积、地形坡度及其与汇区沉积扇体

(体积)间配置关系,分别拾取恩平组早晚期源区流域沉积供给通量(Q_s)与汇区(砂质)沉积堆积通量(Q_t)。

1)基于全球488条河流30年沉积通量数据而建立的BQART模型^[25],近年来被逐渐应用于陆相深-时源-汇系统中沉积通量预测^[5,26],即:

$$Q_s = \omega B Q^{0.31} A^{0.5} R T (T \geq 2^\circ \text{C}) \quad (1)$$

式中: Q_s 为沉积通量,Mt/yr; ω 为常数,无量纲,取0.0006; B 为代表流域岩性、冰川作用和人类影响因子的环境参数,无量纲; Q 为河道径流流量, km^3/yr ; A 为流域面积, km^2 ; R 为流域最大高差, km ; T 为流域年平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

利用碳、氧同位素数据重建的珠江口盆地早-中始新世年平均气温大概在 20°C 左右^[27],环境参数 B 在剔除人类活动影响和冰川活动后取1,因而沉积通量关键在于源区流域面积(A)和地势高差(R)——响应河道陡峭系数。当年平均气温高于 2°C 时, $Q_s = 0.0006 B Q^{0.31} A^{0.5} R T$,依据Syvitski和Milliman^[25]提出的沉积区与河道径流量之间的现代经验关系 $Q = 0.0029 A^{0.7573}$,可最终得到研究区通量关系式: $Q_s = 0.00196 A^{0.7348} R$ 。

2)汇区堆积的砂质沉积通量(Q_t)主要受构造阶段、边界要素及沉积环境(相带)等方面影响^[5,26]。据此,惠州26和惠州27构造区陆相裂陷盆地扇三角洲-辫状河三角洲沉积通量可由下面公式估算,即:

$$M = V \sum_{i=1}^n P_{Si} \rho_i P_{Ti} \quad (2)$$

$$Q_t = M / (t \times 10^6) \quad (3)$$

式中: M 为陆源碎屑的质量,Mt; Q_t 为沉积通量,Mt/yr; V 为沉积体积, km^3 ; n 为地层单元中岩石类型个数; P_{Si} 为第 i 种岩石类型的百分比; ρ_i 为第 i 种岩石类型的密度, g/cm^3 ; P_{Ti} 为第 i 种岩石类型中陆源碎屑的百分比; t 为地层单元的沉积时间,Myr。

惠州26构造区沉积相带以粗砂岩和砾岩为主,其块体密度在 $2.40 \sim 2.66 \text{ g}/\text{cm}^3$ ^[28],平均值 $2.53 \text{ g}/\text{cm}^3$,惠州27构造区沉积相带以细砂岩、粉-细砂岩为主,其块体密度在 $2.20 \sim 2.71 \text{ g}/\text{cm}^3$ ^[28],平均值 $2.46 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

晚始新世恩平组处于断陷向拗陷转换阶段^[29-30],量化拾取东沙隆起北缘源区陡缓坡流域面积、流域最大高差及汇区扇体体积,求取惠州26与惠州27构造区晚始新世早晚期源区供给通量与汇区堆积通量(表1),可知 T_9^0 界面上下惠州26和27构造区的汇区颗粒质堆积通量均变现出增大的趋势。其中,惠州26构造区仅增大25%,而惠州27构造区增大近60%。联合沉积区内颗粒质沉积通量的计算,在区内最大高差数值相对稳定框架下,可有效佐证 T_9^0 界面上、下流域区的合并和扩张,指示构造裂点的跃迁变化。

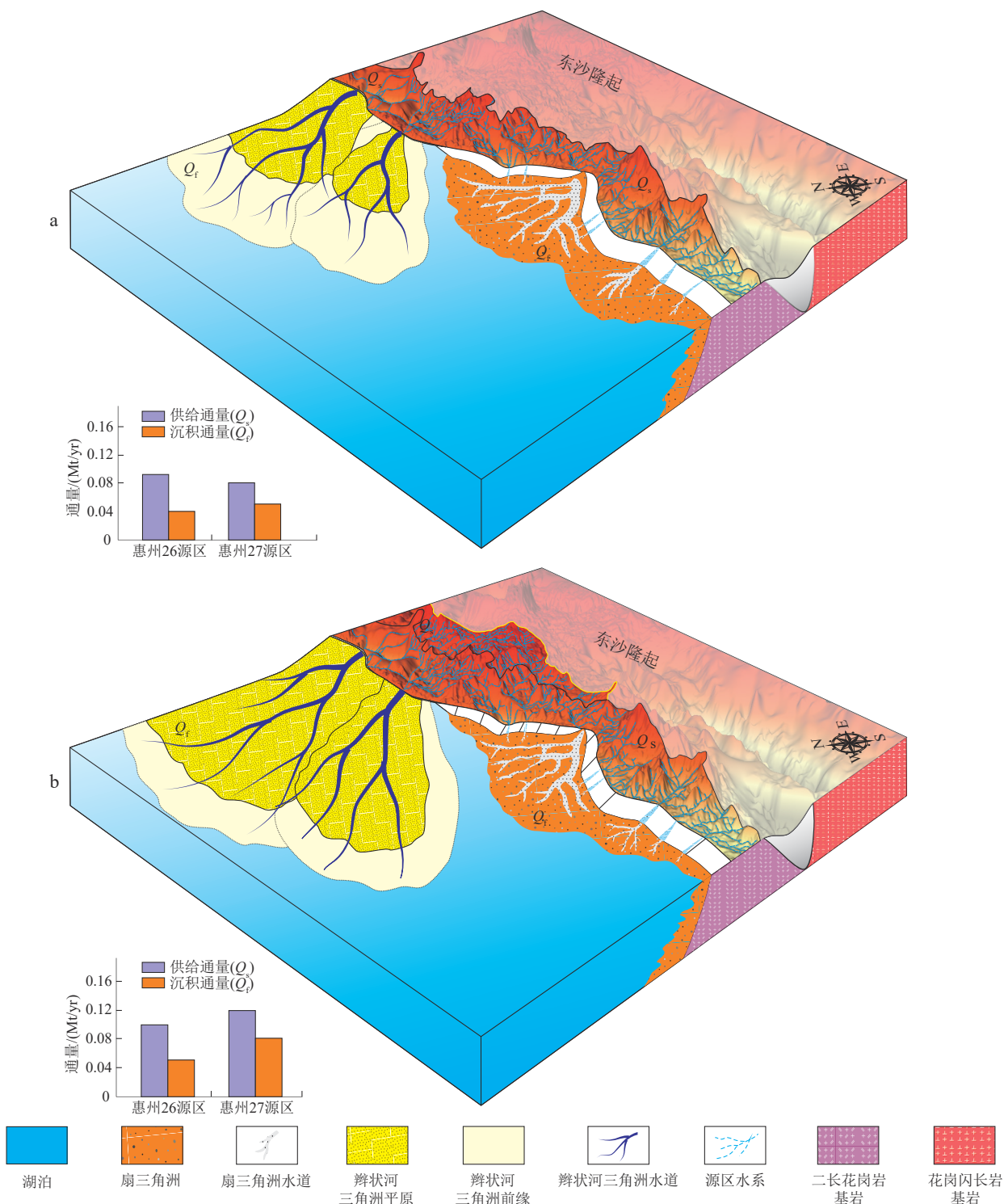


图7 南海东沙隆起北缘晚始新世恩平组沉积期陡、缓坡流域构造裂点迁移及沉积扇体响应

Fig. 7 Tectonic knickpoint migration and its sedimentary fan responses in the steep and gentle slope catchment of the northern Dongsha Uplift, South China Sea during the deposition of the Late Eocene Enping Formation

a. 恩平组沉积早期; b. 恩平组沉积晚期

4 讨论及展望

通过对源区残余地貌和汇区沉积记录开展独立的

分析,发现残余地貌保存的裂点(图4)与文昌恩平组沉积时期活跃的断层活动相匹配(图5)。相较于惠州26区,惠州27区下游坡度相对较小(图4),同样与其相对较弱的边界断裂活动性相一致(图5)。此外,我们

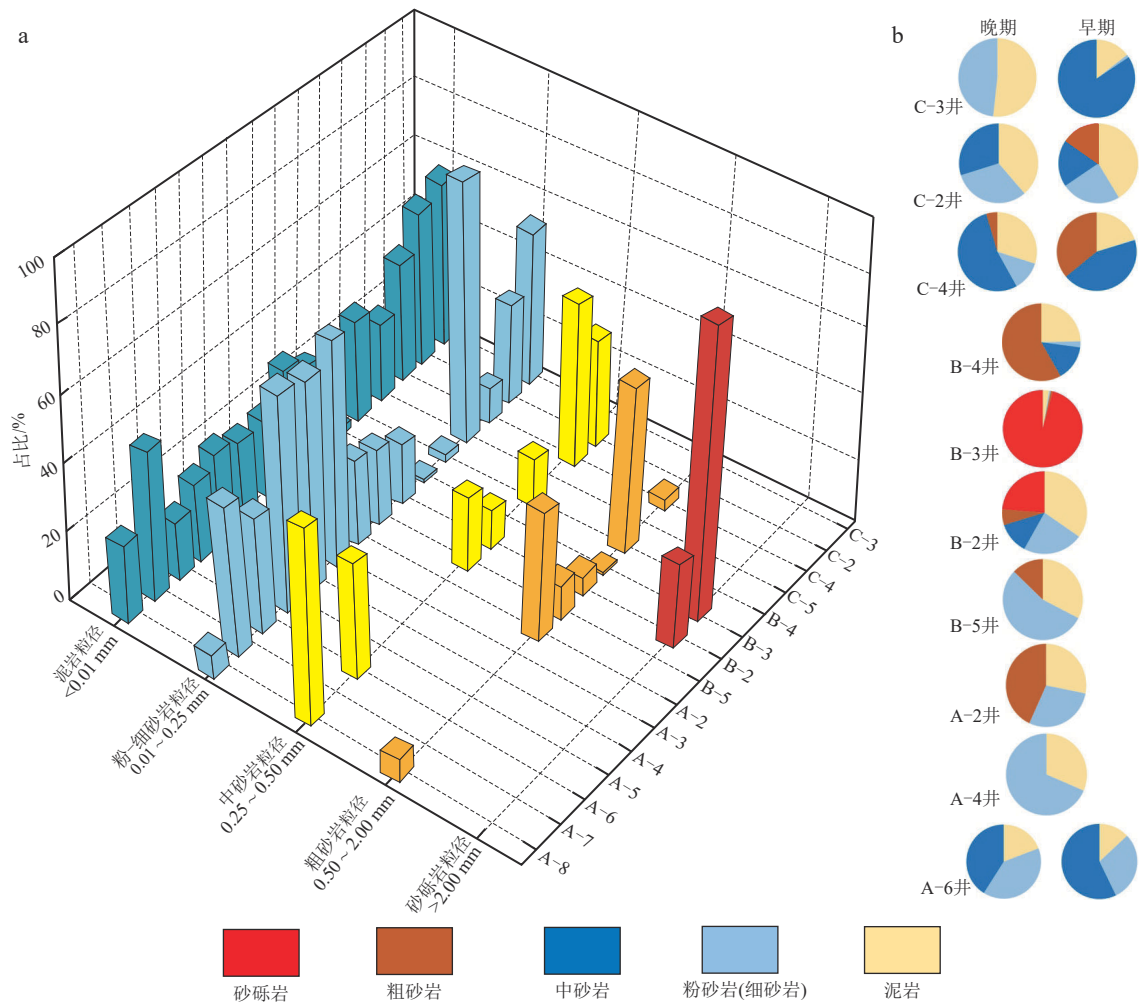


图8 南海东沙隆起北缘晚始新世(恩平组沉积期)已钻井岩性-粒度分布柱状图(a)及各井岩性分布饼状图(b)

Fig. 8 Statistical histogram showing the lithological grain size from the Eocene boreholes (Enping Formation) in the northern Dongsha Uplift, South China Sea

表1 南海东沙隆起北缘晚始新世(恩平组沉积期)陡、缓坡流域沉积供给通量及沉积堆积通量数据

Table 1 Sediment supply flux and sediment accumulation flux data of the Late Eocene steep and gentle slope catchment (Enping Formation) in the northern Dongsha Uplift, South China Sea

源区	A/km ²	R/m	T/°C	Q_s/I (Mt/yr)	V/ (10 ¹⁰ m ³)	T/ (Myr)	Q_t/I (Mt/yr)
惠州26 上段	260	900	20	0.10	3.79	2.1	0.05
惠州26 下段	200	950	20	0.09	2.92	2.0	0.04
惠州27 上段	440	700	20	0.12	6.76	2.1	0.08
惠州27 下段	240	750	20	0.08	3.93	2.0	0.05

观察到两大区域的河流剖面均表现为下游陡峭、上游平缓。其中,惠州27流域表现为两期裂点间隔的三段

式,最上游的河道坡度十分平缓(图4)。一个可能的解释是裂点溯源迁移时沟通了内流水系,形成了上游低缓、下游陡峭的地貌特征。汇区沉积记录表明,岩性在恩平组沉积早、晚期存在转换(图8)。整体变细的岩性指示河流的侵蚀强度相对降低,且惠州27区较惠州26区表现出更细的岩性。与此同时,汇区沉积堆积通量却明显增大,其中惠州27区具有更大的增长幅度(表1)。重要的是,裂点迁移导致的水系合并可以完整地解释所观察到的沉积特征的垂向变化。在晚始新世(恩平组沉积期)早期,初始裂点自断层处形成并向上游迁移,河流优先侵蚀其下游地区,即靠近断层的区域。而更上游的河道仍为内流水系,河流在地貌高点的“阻挡”作用下将搬运的沉积物卸载在平缓的内流盆地中。伴随着裂点的持续迁移,晚始新世晚期内流水系逐渐被沟通,使得流域面积整体显著增大,故汇区沉积堆积通量也明显增大。另一方面,由于内流水系坡

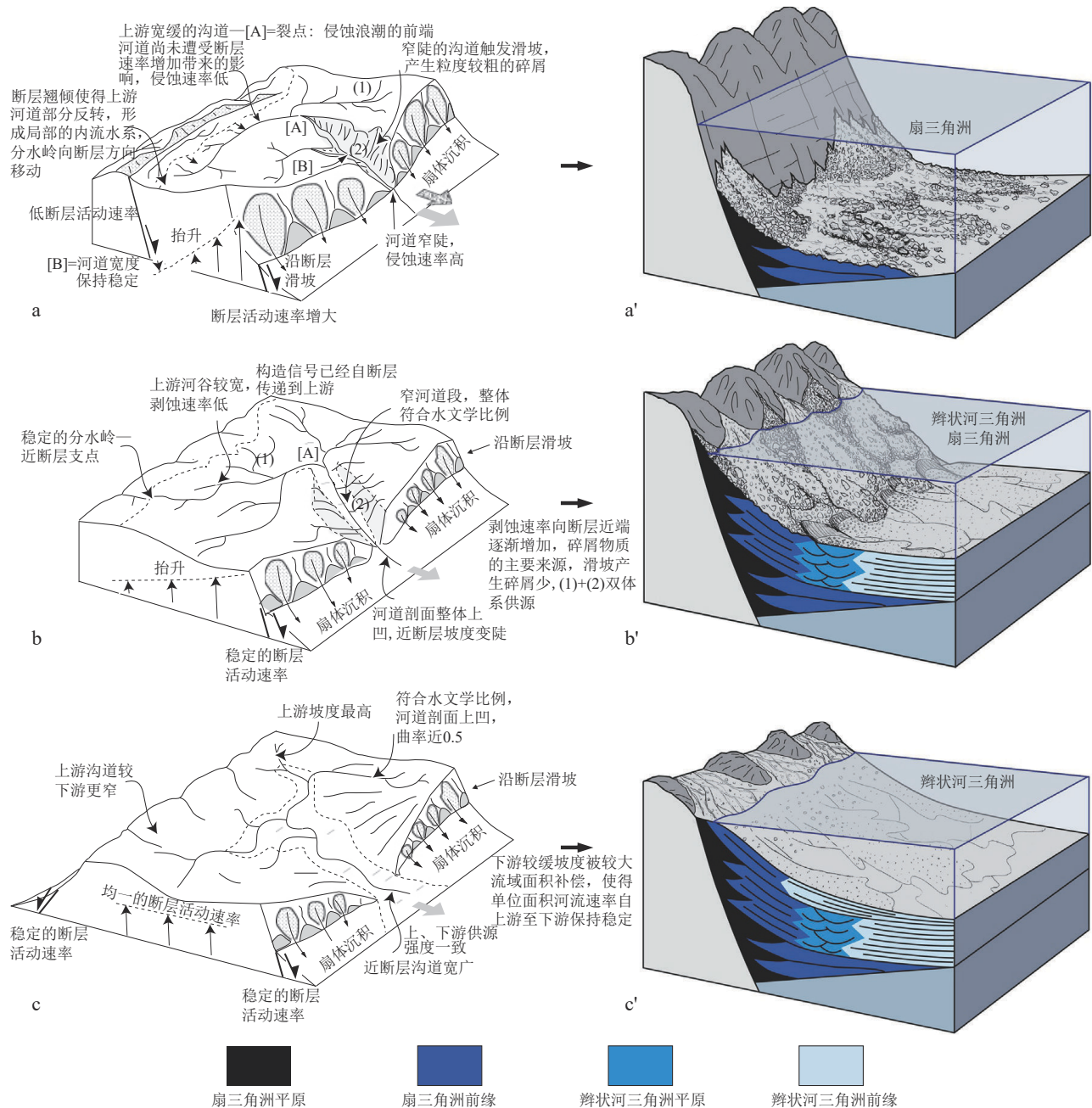


图9 陆相盆地源区流域构造裂点迁移及汇区沉积扇体耦合响应模型(据文献[32,34]修改)

Fig. 9 Coupling response models for tectonic knickpoint migration in the source area and sedimentary fan in the sink area of continental basins (modified after reference[32,34])

a, a'. 早期陡坡流域对应近岸粗粒扇三角洲沉积; b, b'. 中期陡缓坡流域溯源贯通对应扇三角洲与辫状河三角洲复合沉积; c, c'. 晚期缓坡流域对应相对细粒辫状河三角洲沉积

度平缓,产出较细的砂质沉积物,进而使得河流整体的侵蚀能力较晚始新世早期相对减弱。

综合源区地貌和沉积区沉积体系配置,构建了陆相裂陷盆地深-时源-汇响应模型(图9)。按照裂陷盆地盆缘断裂生长连接过程,将断裂陡坡带源区及汇区的配置概括为断陷活动期(图9a, a')、断-拗转换期(图9b, b')及拗陷沉降期(图9c, c')^[31-33]。

1) 断-陷活动期:边界断裂活动性强,源区坡度大、有效流域面积小,盆内水系以短距离、季节性的山间河流为主,下蚀作用改造,侵蚀速率高(图9a),发育快速沉积充填,沉积厚度变化大、近源粗粒的扇三角洲(图9a')。

2) 断-拗转换期:盆缘断裂活动强度减弱,近源流域与远源流域开始溯源连通,有效流域面积显著扩大,以长短轴物源体系联合作用为主,沉积物搬运通道以

长轴向河道及侧向断面下切沟谷为主(图9b),盆内沉积体系以相对长轴的辫状河三角洲及扇三角洲沉积为主(图9b')。

3) 拗陷沉降期:断裂活动趋于停滞,以构造热沉降为主,源区地貌夷平、贯通,构造裂点向远端迁移,源区流域面积显著扩大,河网水系发育,河流以侧蚀作用为主(图9c),以相对细粒的浅水辫状河三角洲沉积为主(图9c')。

可见,源区地貌特征和汇区沉积记录能在地貌演化的视角下被成功调和。这一发现表明,遭受后期改造较弱的残余地貌很可能仍然保存着深-时的源-汇信息。但显然,这一设想的验证仍需更多同时开展精细的残余地貌和沉积记录分析的实例研究。事实上,我们认为将残余地貌纳入到分析流程中后,将极大促进深-时源-汇系统研究:源区不必再保持一成不变的面积或大小,可以从动态视角分析从源到汇的变化,有助于更合理地揭示源区流域地貌特征、基岩组成与汇区粒度、成分及沉积通量之间的耦合响应关系。源区裂点迁移调控制约汇区沉积物分布和规模,有助于革新深-时源-汇系统的构造格局和沉积模式^[1,4,10]。

基于源区构造裂点迁移解读残余地貌所携带地质信息,进而构建陆相裂陷盆地深-时源-汇分析预测模型能有效预测不同沉积期次的沉积格局,对深-时源-汇系统理论革新及油气勘探具重要启示。

展望深-时源-汇系统研究的推进方向,将聚焦于更加精细化、动态化源-汇系统模型构建:①随着地球物理探测技术的进步,更高分辨率的地震资料联合深-时大数据(time digital earth program)将有助于更加深入理解裂点迁移对沉积环境影响;②气候重建与湖平面变化等多重因素影响下的沉积过程综合评估(沉积物搬运和沉积条件变化)亦是关注重点,多学科多要素联合将有助于增强裂点溯源侵蚀对从源到汇不同路径地表过程的理解。选取源区有效地貌信息,以构造裂点作为切入点,从深-时大数据及多学科领域综合解剖,对于揭示沉积盆地演化历史及其油气资源潜力具有重要价值。

参 考 文 献

- [1] WHITTAKER A C, ATTAL M, ALLEN P A. Characterising the origin, nature and fate of sediment exported from catchments perturbed by active tectonics[J]. *Basin Research*, 2010, 22(6): 809-828.
- [2] HELLAND-HANSEN W, SØMME T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(9): 1008-1033.
- [3] ALLEN P A. Sediment routing systems: The fate of sediment from source to sink [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [4] ATTAL M, MUDD S M, HURST M D, et al. Impact of change in erosion rate and landscape steepness on hillslope and fluvial sediments grain size in the Feather River Basin (Sierra Nevada, California)[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2015, 3(1): 201-222.
- [5] LIU Qianghu, ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, et al. Proportional relationship between the flux of catchment-fluvial segment and their sedimentary response to diverse bedrock types in subtropical lacustrine rift basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 351-364.
- [6] 刘强虎,李志焱,陈贺贺,等. 陆相裂陷盆地深时源-汇系统关键地质问题及革新方向[J]. *地球科学*, 2023, 48(12): 4586-4612.
LIU Qianghu, LI Zhiyao, CHEN Hehe, et al. Key geological issues and innovation directions in deep-time source-to-sink system of continental rift basins [J]. *Earth Science*, 2023, 48(12): 4586-4612.
- [7] 徐长贵,龚承林. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 521-538.
XU Changgui, GONG Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 521-538.
- [8] 朱红涛,徐长贵,杜晓峰,等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 539-552.
ZHU Hongtao, XU Changgui, DU Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 539-552.
- [9] CROSBY B T, WHIPPLE K X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand[J]. *Geomorphology*, 2006, 82(1/2): 16-38.
- [10] WHITTAKER A C, WALKER A S. Geomorphic constraints on fault throw rates and linkage times: Examples from the Northern Gulf of Evia, Greece[J]. *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2015, 120(1): 137-158.
- [11] WHITTAKER A C, BOULTON S J. Tectonic and climatic controls on knickpoint retreat rates and landscape response times [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F2): F02024.
- [12] 栾锡武,刘鸿,彭学超. 南海北部东沙古隆起的综合地球物理解释[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3217-3232.
LUAN Xiwu, LIU Hong, PENG Xuechao. The geophysical interpretation of a Dongsha ancient uplift on the northern margin of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3217-3232.
- [13] 李德生,姜仁旗. 南海东沙隆起及其周围坳陷的地质演化[J]. *海洋学报*, 1989, 11(6): 737-741.
LI Desheng, JIANG Renqi. Geology evolution at Dongsha uplift and its surrounding depression in South China Sea [J]. *Acta*

- Oceanologica Sinica, 1989, 11(6): 737-741.
- [14] 单竞男, 张功成, 饶松, 等. 南海北缘东沙隆起中生代以来的埋藏史和热史重建——来自 LF35-1-1 井(U-Th)/He 和 Ro 的证据[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3899-3915.
- SHAN Jingnan, ZHANG Gongcheng, RAO Song, et al. Mesozoic burial and geothermal history reconstruction of the Dongsha Uplift located in northern margin of the South China Sea: Evidence from (U-Th)/He and vitrinite reflectance Ro data of drillhole LF35-1-1 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3899-3915.
- [15] 张丽丽, 舒誉, 蔡国富, 等. 珠江口盆地东部始新世—渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊1): 153-165.
- ZHANG Lili, SHU Yu, CAI Guofu, et al. Eocene-Oligocene sedimentary environment evolution and its impact on hydrocarbon source conditions in eastern pearl river mouth basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 153-165.
- [16] 李平鲁, 梁慧娟, 戴一丁. 珠江口盆地基岩油气藏远景探讨[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(6): 361-369.
- LI Pinglu, LIANG Huixian, DAI Yiding. Exploration perspective of basement hydrocarbon accumulations in the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1998, 12(6): 361-369.
- [17] LARSEN I J, EGER A, ALMOND P C, et al. The influence of erosion and vegetation on soil production and chemical weathering rates in the Southern Alps, New Zealand[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 608: 118036.
- [18] WOBUS C W. Geomorphic and thermochronologic signatures of active tectonics in the central Nepalese Himalaya [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005: 17-70.
- [19] BERLIN M M, ANDERSON R S. Modeling of knickpoint retreat on the Roan Plateau, western Colorado [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F3): F03S06.
- [20] SCHWANGHART W, SCHERLER D. Short communication: TopoToolbox 2-MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences [J]. Earth Surface Dynamics, 2014, 2(1): 1-7.
- [21] WRONA T, WHITTAKER A C, BELL R E, et al. Rift kinematics preserved in deep-time erosional landscape below the northern North Sea[J]. Basin Research, 2023, 35(2): 744-761.
- [22] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. The influence of pre-existing basement faults on the Cenozoic structure and evolution of the proximal domain, northern South China Sea rifted margin[J]. Tectonics, 2020, 39(3): e2019TC005845.
- [23] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 南海东部富砂砾型大中型油气田发现与启示——以珠江口盆地惠州 26 洼古近系恩平组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 14-27.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Discovery and inspiration of large-and medium-sized glutenite-rich oil and gas fields in the eastern South China Sea: An example from Paleogene Enping Formation in Huizhou 26 subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 14-27.
- [24] 施和生, 舒誉, 杜家元, 等. 珠江口盆地古近系石油地质[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- SHI Hesheng, SHU Yu, DU Jiayuan, et al. Petroleum geology of Paleogene in the Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [25] SYVITSKI J P M, MILLIMAN J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. The Journal of Geology, 2007, 115(1): 1-19.
- [26] ZHANG Jinyu, COVAULT J, PYRCZ M, et al. Quantifying sediment supply to continental margins: Application to the Paleogene Wilcox Group, Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(9): 1685-1702.
- [27] 徐川. 珠江口盆地阳江东凹始新统文昌组湖相泥岩有机质富集机制[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- XU Chuan. Enrichment mechanism of organic matter in the lacustrine mudstone of the Eocene Wenchang Formation, eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [28] 石油云. 岩石的各种密度[EB/OL]. [2024-09-01]. <http://www.petroleumcloud.cn/pages/707.html>.
- Oil Cloud. Various densities of rocks[EB/OL]. [2024-09-01]. <http://www.petroleumcloud.cn/pages/707.html>.
- [29] 高阳东, 汪旭东, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷恩平组内部构造——沉积转换面识别及意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 961-970.
- GAO Yangdong, WANG Xudong, LIN Heming, et al. Characteristics and significances of the tectono-sedimentary transitional unconformity in Enping Formation of Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 961-970.
- [30] 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州 26 洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期源-汇系统及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613-625.
- PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613-625.
- [31] GAWTHORPE R L, LEEDER M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins [J]. Basin Research, 2000, 12(3/4): 195-218.
- [32] HENSTRA G A, GRUNDTVÅG S A, JOHANNESSEN E P, et al. Depositional processes and stratigraphic architecture within a coarse-grained rift-margin turbidite system: The Wollaston Forland Group, east Greenland [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 76: 187-209.
- [33] 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 746-762.
- ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, GE Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 746-762.
- [34] WHITTAKER A C, COWIE P A, ATTAL M, et al. Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: New field observations from the Central Apennines, Italy [J]. Basin Research, 2007, 19(4): 529-556.